

Metaheurísticas aplicadas al Problema de Ruteo de Vehículos

**Villagra S., Villagra A., Lasso M., Pandolfi D., de San Pedro E.,
Rasjido J., Valdez J., Seron N., Montenegro C., Miño R.**

LabTEm - Unidad Académica Caleta Olivia
Universidad Nacional de la Patagonia Austral
{svillagra, avillagra, mlasso, dpandolfi, edesanpedro, jrasjido, jcvalez, nseron, cmontenegro,
rminio}@uaco.unpa.edu.ar

Leguizamón G.

Laboratório de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Computacional (LIDIC)
Departamento de Informática - Universidad Nacional de San Luis
legui@unsl.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta un proyecto que involucra dos líneas de investigación. La primera relacionada a Metaheurísticas, en la que el grupo tiene una amplia experiencia demostrada a través de la sostenida producción científica desde sus inicios en el año 1998. En este sentido se pretende realizar investigación de mecanismos avanzados de manejos de restricciones y también nuevas propuestas para la mejora del proceso de búsqueda. Ambos aspectos a estudiar serán validados a través de estudios experimentales intensivos y analizados rigurosamente bajo la teoría estadística apropiada. Finalmente, la segunda línea de trabajo se vincula con la aplicación de técnicas Metaheurísticas, al problema de ruteo de vehículos.

El transporte juega un papel importante en las tareas de logística de muchas compañías, ya que normalmente representa un alto porcentaje del valor añadido a los bienes. Un problema destacado en el campo del transporte consiste en encontrar la ruta óptima para una flota de vehículos que sirven a un conjunto de clientes. Este escenario general presenta muchas situaciones para definir escenarios de problemas relacionados, como por ejemplo: determinar el número óptimo de vehículos, encontrar las rutas más cortas, etc., todos ellos están sujetos a muchas restricciones como la velocidad del vehículo, el tiempo de ventana para las entregas, etc. Esta variedad de escenarios nos lleva a una plétora de distintos problemas en la práctica.

Palabras clave: Metaheurísticas, Manejo de Restricciones, Mejoras en el proceso de búsqueda, Problema de Ruteo de Vehículos.

CONTEXTO

Este proyecto de investigación se desarrolla en el Laboratorio de Tecnologías Emergentes (LabTEm) en el marco del programa de Investigación en Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral.

1. INTRODUCCION

El problema de ruteo de vehículos (Vehicle Routing Problem o VRP), es un problema de optimización combinatoria de gran importancia en diferentes entornos logísticos. “El problema de distribuir productos desde ciertos depósitos a sus usuarios finales juega un papel central en la gestión de algunos sistemas logísticos, y su adecuada planificación puede significar considerables ahorros. Esos potenciales ahorros justifican en gran medida la utilización de técnicas de investigación operativa como facilitadoras de la planificación, dado que se estima que los costos del transporte representan entre el 10% y el 20% del costo final de los bienes.” [Toth & Vigo 2001].

El VRP tiene por objetivo encontrar las rutas que recorran cada uno de los vehículos (ubicados en un depósito) de manera que se satisfagan los requerimientos de los clientes, las restricciones operativas y se minimice el costo total de transporte.

Debido a la dificultad de este problema (NP-hard) y a sus múltiples aplicaciones industriales, ha sido ampliamente estudiado tanto de manera práctica como teórica [Christofides et al. 1979].

En la historia reciente del VRP ha habido una evolución constante en la calidad de las metodologías resolutivas utilizadas en este problema, pertenecientes tanto al campo de investigación exacto como al heurístico. De todas formas, dada la dificultad del problema, ningún método exacto conocido es capaz de encontrar el óptimo para instancias que contengan más de 50 clientes [Golden et al. 1998]. Se puede encontrar una recopilación de técnicas exactas de solución existentes para los problemas de ruteo de vehículos [Laporte 1992]. No obstante, los de gran dimensión resultan imposibles de solucionar en tiempo polinomial, por lo que el VRP se denomina NP-hard [Machado et al. 2000] y [Olivera 2004], donde no es posible alcanzar una solución óptima y dependiendo de las características especiales de

clientes, locaciones y producto/servicio, requiere la elaboración de una metodología de solución específica con la cual sea factible aproximarse lo mejor posible al óptimo. Debido a estas razones y a la relevancia práctica de VRP se han propuesto varias soluciones a este problema haciendo uso de heurísticas y Metaheurísticas.

Las Metaheurísticas (MHs) [Glover et al. 2003] son métodos que integran de diversas maneras, procedimientos de mejora local y estrategias de alto nivel para crear un proceso capaz de escapar de óptimos locales y realizar una búsqueda robusta en el espacio de búsqueda. En su evolución, estos métodos han incorporado diferentes estrategias para evitar la convergencia a óptimos locales, especialmente en espacios de búsqueda complejos. Principalmente abordaremos en este proyecto Algoritmos Evolutivos (AEs). Los AEs son Metaheurísticas que están inspiradas en la selección natural y la evolución que se dan en la naturaleza, la manera en que las especies que forman un ecosistema son capaces de adaptarse a los cambios de su entorno. Esta familia de técnicas sigue un proceso iterativo y estocástico que opera sobre un conjunto de individuos (población), donde cada individuo representa una solución potencial al problema que se está resolviendo. A los individuos se les asigna un valor de adecuación (fitness) como una medida de su aptitud para el problema en consideración. Este valor representa la información cuantitativa que el algoritmo usa para guiar la búsqueda. La relación entre la explotación de buenas soluciones (potenciada en la fase de selección) y la exploración de nuevas zonas del espacio de búsqueda es uno de los factores clave de su alto rendimiento con respecto a otras metaheurísticas.

La mayoría de los problemas de optimización incluyen restricciones de cierta clase, que constituyen grandes desafíos a la resolución de este tipo de problemas. Las restricciones son límites impuestos a las variables de decisión y en general, son una parte integral de la formulación de cualquier problema [Dhar & Ranganathan 1990].

La experiencia del grupo de investigación en esta temática [Pandolfi et al., 2001, 2002, 2003, 2004, 2010], [Villagra et al. 2006, 2007, 2008] permite avanzar en situaciones más complejas y diversas y que derivan en las presentes líneas de investigación y desarrollo.

2. LINEAS DE INVESTIGACION y DESARROLLO

- **Problema de ruteo de vehículos**

Uno de los primeros estudios que trataron el problema de ruteo de vehículos se remonta al año 59, en este trabajo Dantzig y Ramser [Dantzig & Ramser, 1959] tratan un problema de despacho con camiones, que surge como una generalización del

problema clásico del agente viajero (TSP) en el que un vendedor tiene que visitar una serie de clientes una sola vez, para luego volver al lugar de partida, construyendo una camino hamiltoniano sobre el grafo constituido por los clientes (vértices) y los caminos posibles entre un cliente y otro (aristas).

Se han propuesto diferentes variaciones del VRP canónico con la intención de acercarse a contextos reales del problema, estos problemas incluyen la adición de variables y restricciones. A continuación se detallan algunas de sus variantes: VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows), y variantes (VRPHTW) y (VRPSTW). CVRP (Capacited Vehicle Routing Problem), SVRP (Stochastic Vehicle Routing Problem), VRPSD (Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands), VRPSC (Vehicle Routing Problem with Stochastic Customers), VRPST (Vehicle Routing Problem with Stochastic Times), SDVRP (Split Delivery Vehicle Routing Problem), VRPB (Vehicle Routing Problem with Backhauls), VRPPD (Vehicle Routing Problem with Pick-Up and Delivery) y PVRP (Periodic Vehicle Routing Problem), entre otras.

En VRP ha habido una evolución constante en la calidad de las metodologías resolutivas utilizadas en este problema, pertenecientes tanto al campo de investigación exacto como al heurístico. Algunas de las soluciones hacen uso de heurísticas y metaheurísticas como por ejemplo, Tabu Search [Cordeau 1997], Simulated Annealing [Osman 1993], Ant Colony [Bell & McMullen 2004], Algoritmos Evolutivos [Bäker & Ayechev 2003], [Xu et al. 2005], entre otras.

Además, la potencia de la exploración de algunas técnicas como los Algoritmos Genéticos o los Sistemas de Enjambres podría combinarse con una etapa de búsqueda local eficaz permitiéndonos de esta manera refinar las soluciones hacia el óptimo.

- **Manejo de Restricciones y Mejora del proceso de búsqueda**

En el dominio específico de problemas discretos, tales como Knapsack Problem, Set Covering Problem, Vehicle Routing Problem, y todos los tipos de Scheduling Problems, todos están sujetos a restricciones. El espacio de búsqueda de estos problemas se subdivide en dos subconjuntos, el espacio de soluciones factibles y el espacio de soluciones no factibles. Estos subespacios no necesariamente son convexos y no necesariamente están conectados. Para la resolución del problema de optimización sujeto a restricciones los algoritmos de búsqueda, tal como lo son AEs, promueven soluciones que navegan en ambos subespacios. El problema consistirá entonces en cómo tratar soluciones no-factibles para explorar el subespacio de soluciones factibles [Michalewicz 1997].

Debido a la experiencia del grupo de investigación en esta área, nos permite avanzar en situaciones más complejas en las siguientes temáticas relacionadas: (1) Manejo de Restricciones: Los Algoritmos Evolutivos han sido aplicados exitosamente en un amplio rango de aplicaciones [Richardson et al. 1989], [Goldberg 1989], [Mitchell 1996], sin embargo, un aspecto que normalmente no se considera cuando se los usa para optimización, es que estos algoritmos son procedimientos de optimización sin restricciones y por esta razón es necesario encontrar mecanismos de incorporación de restricciones (que normalmente existen en cualquier aplicación del mundo real) en la función de aptitud.

En los últimos años se han propuesto varios métodos para el manejo de restricciones con algoritmos evolutivos para problemas de optimización. Estos métodos han sido agrupados por Michalewicz [Koziel & Michalewicz, 1999] [Michalewicz & Schoenauer, 1996] en cuatro categorías:

- Métodos basados en la preservación de soluciones factibles: La idea detrás de este método está basada en operadores especializados que transforman padres factibles en hijos factibles. El método asume restricciones lineales únicamente y un punto de comienzo factible o una población inicial factible.

- Métodos basados en funciones de penalidad: Muchos algoritmos evolutivos incorporan métodos de manejo de restricciones basados en el concepto de funciones de penalidad exterior que penalizan soluciones no-factibles. Estos métodos difieren en importantes detalles tales como la forma de designar la función de penalidad y aplicarla a soluciones no-factibles.

- Métodos que hacen una clara distinción entre soluciones factibles y no-factibles: Hay algunos métodos que enfatizan la distinción entre soluciones factibles y no-factibles en el espacio de búsqueda. Uno de estos métodos distingue entre individuos factibles y no-factibles donde cualquier solución factible es mejor que cualquier otra no-factible.

- Otros métodos híbridos: Estos métodos combinan técnicas de computación evolutiva con procedimientos determinísticos para problemas de optimización numérica.

Por otro lado Coello Coello [Coello Coello, 2002] propone una taxonomía útil de técnicas para el manejo de restricciones que incluyen: (a) Funciones de Penalidad: disminuyen el fitness de soluciones no-factibles para que las soluciones factibles sean elegidas en el proceso de selección, (b) representaciones y operadores especiales: para preservar la factibilidad de los hijos generados, (c) algoritmos de reparación: para transformar las soluciones no-factibles en soluciones factibles, (d) separaciones de funciones objetivo y restricciones: consiste en usar estos valores como criterios separados en el proceso de selección de un

Algoritmo Evolutivo y (e) métodos híbridos: combinan diferentes algoritmos y/o mecanismos. Estudios recientes en optimización numérica con restricciones usando algoritmos evolutivos y otros enfoques bio-inspirados pueden encontrarse en Mezura-Montes [Mezura-Montes, 2009].

(2) La segunda temática a abordar sería de mejora en el proceso de búsqueda: Como se mencionó anteriormente las MHs son métodos que integran de diversas maneras, procedimientos de mejora local y estrategias de alto nivel para crear un proceso capaz de escapar de óptimos locales y realizar una búsqueda robusta en el espacio de búsqueda. En su evolución, estos métodos han incorporado diferentes estrategias para evitar la convergencia a óptimos locales, especialmente en espacios de búsqueda complejos. Aunque las Metaheurísticas en general presentan un bajo nivel de desarrollo desde el punto de vista matemático, tales procesos son válidos en muchas situaciones prácticas para las cuales se han obtenido resultados muy interesantes para problemas del mundo real, en particular en el ámbito de la industria.

Resta mencionar como punto adicional, que la garantía de un adecuado desempeño de las MHs en general depende en gran medida del desempeño de los operadores o mecanismos de exploración propios de cada una de ellas. En este sentido, la utilización de enfoques avanzados para mejorar el proceso de exploración es un tópico de interés dado su inmediata aplicación y beneficio directo respecto a posibles mejoras en el diseño de MHs. Por ejemplo, el concepto de sociobiología [Wilson 1975] es mecanismo evolutivo exitoso que podría ser usado como mecanismo alternativo en los modelos algorítmicos o metaheurísticas que imitan el proceso evolutivo. En este sentido, la perspectiva Darwiniana tradicional explica la regulación de la descendencia a través de las restricciones del medio ambiente: alimentos, clima y depredación, las que en su conjunto regulan los tamaños y adaptabilidad de las poblaciones. Por el contrario, según [Wynne-Edwards 1962], los animales pueden autorregular su propia población estimando restricciones del ambiente y por lo tanto variar sus tasas de reproducción. Por otro lado, la teoría de [Hamilton 1964] sobre la evolución de genética del comportamiento social, propone que el valor adaptativo de un individuo se podría medir no solamente por su éxito personal en materia de reproducción, sino a través del beneficio de la reproducción de otros individuos (parientes). La suma de estos dos conceptos fue denominado como "inclusive fitness" o adecuación adaptativa global. Basado en estos conceptos previos y en el constante desarrollo e investigación de conceptos útiles para mejorar el desempeño de los enfoques metaheurísticos, se plantea como una alternativa, el desarrollo de algoritmos y/o mejoras en los enfoques metaheurísticos a través de la

incorporación de elementos vinculados al comportamiento social de determinadas especies del mundo animal.

3. RESULTADOS OBTENIDOS/ESPERADOS

A continuación se mencionan los resultados esperados del proyecto:

- Investigación en tendencias actuales en el problema de ruteo de vehículos.
- Estudio y desarrollo de métodos para el manejo de restricciones
- Investigación en tendencias actuales respecto a la eficiencia de las distintas Metaheurísticas en la exploración del espacio de búsqueda.
- Determinación de nuevos conceptos a ser incluidos en la fase explorativa.
- Diseño e implementación de las distintas Metaheurísticas consideradas aplicando los conceptos alternativos o mejorados.
- Estudio comparativo en profundidad de los algoritmos propuestos contra técnicas tradicionales sobre el problema seleccionado.
- Análisis de los algoritmos propuestos con el objetivo de estudiar formalmente las complejidades computacionales involucradas en cada uno de ellos.

4. FORMACION DE RECURSOS HUMANOS

Dos integrantes de esta línea de investigación están desarrollando su Tesis de Doctorado en temáticas afines.

Tres integrantes han comenzado su Maestría orientando sus cursos y trabajos a esta línea de investigación.

Se dirigen dos Trabajos Finales de Ingeniería en Sistemas y se cuenta con un Becario de Investigación, alumno de la carrera Ingeniería en Sistemas.

5. BIBLIOGRAFIA

[Bäker & Ayechev 2003] Bäker B. M. and Ayechev M. A.. A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, pages 787-800. 2003.

[Bell & McMullen 2004] Bell J. and McMullen P.. Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem. *Advanced Engineering Informatics*, pages 41-48. 2004.

[Christofides et al. 1979] Christofides N., Mingozzi A., and Toth P. *Combinatorial Optimization*, chapter The Vehicle Routing Problem, pages 315-338. John Wiley & Sons, 1979.

[Coello Coello 2002] Coello Coello C., "Theoretical and numerical constraint-handling

techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 191, No. 11-12. (4 January 2002), pp. 1245-128.

[Cordeau 1997] Cordeau J-F, Gendreau M. and Laporte G. A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. *Networks*, 30(2):105-119, 1997.

[Dantzing & Ramser 1959] Dantzing G. B. and Ramser J. H., "The Truck Dispatching Problem" *Management Science*, Vol. 6, No. 1 (Oct., 1959), pp. 80-91.

[Dhar & Ranganathan 1990] Dhar, V., and Ranganathan, N. Integer Programming versus Expert Systems: An Experimental Comparison. *Communications of the ACM* 33:323-336. (1990).

[Glover et al. 2003] Glover F., Kochenberger G.H. (editors)- *Handbook of Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, 2003.

[Goldberg 1989] Goldberg, D.E.. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*; Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, 1989.

[Golden et al. 1998] Golden B.L., Wasil E.A., Kelly J.P., and Chao I-M. *Fleet Management and Logistics*, chapter The Impact of Metaheuristics on Solving the Vehicle Routing Problem: algorithms, problem sets, and computational results, pages 33-56. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.

[Hamilton 1964] Hamilton W. D.. The genetical evolution of social behaviour. *Journal of Theoretical Biology*, num 7, 1964, pp. 1-52.

[Koziel & Michalewicz 1999]. Koziel, S. and Michalewicz, Z. (1999). Evolutionary algorithms, homomorphous mapping, and constrained parameter optimization. *Evolutionary Computation*, 7(1): 19-44.

[Laporte 1992] Laporte, G., The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59, 1992, pp. 345-358.

[Machado et al. 2000] Machado, P., Tavares, J., Pereira, F. and Costa, E., *Vehicle Routing Problem: Doing it the Evolutionary Way*. 2000.

[Mezura-Montes 2009] Mezura-Montes. E. (Ed) 2009. *Constraint-Handling in Evolutionary Optimization*. Springer.

[Michalewicz 1997] Michalewicz Z.; Genetic Algorithms + Data Structures = Evolutions Programs; Springer-Verlag, third, revised edition, 1997.

[Michalewicz & Schoenauer 1996] Michalewicz, Z and Schoenauer, M. (1996) Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems. *Evolutionary Computation*, 4(1): 1-32.

[Mitchell 1996] Mitchell M., An Introduction to Genetic Algorithms. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1996.

[Olivera 2004] Olivera, A., Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos. Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería. Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. 2004.

[Osman 1993] Osman I. H. Metastrategy Simulated Annealing and Tabu Search Algorithms for the vehicle routing problem. *Ann. Operations Research* 40(1), pages 421-451. 1993.

[Pandolfi et al., 2001] Pandolfi D., Vilanova G, de San Pedro M., Villagra A., Gallard R. - Multirecombining studs and immigrants in evolutionary algorithm to face earliness-tardiness scheduling problems - ICSC Symposium on on Soft Computing and Intelligent Systems for Industry presentado y publicado en los proceedings, University of Paisley, Scotland Junio 2001 pp 138.

[Pandolfi et al., 2002] Pandolfi D., de San Pedro M., Villagra A., Vilanova G, Gallard R. - A survey an multirecombined evolutionary approach for single machine scheduling - 1er Congreso Español de Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados – AEB'02 ISBN 84-607-3913-9 pags. 111-117 Merida– España Febrero 2002.

[Pandolfi et al., 2003] Pandolfi D., Lasso M., de San Pedro M., Villagra A., Gallard R. - Evolutionary algorithms to solve average tardiness problems in single machine environments - Proceedings of the International Conference on Computer Science, Software Engineering Information Technology, e-business and Applications (CSITeA03), pp 444-449, Rio de Janeiro, June 2003, Brasil.

[Pandolfi et al., 2004] Pandolfi D., Lasso M., de San Pedro M., Villagra A., Gallard R. - Knowledge Insertion: an Efficient Approach to Reduce Search Effort in Evolutionary Scheduling - *Journal of Computer Science & Technology*, pp 109-114, Vol 4 Number 2 Agosto 2004 ISSN 1666-6038

[Pandolfi et al. 2010] Pandolfi D., Villagra A., De San Pedro E., Lasso M., Leguizamón G. An

experimental study of an evolutionary tool for scheduling in oil wells. Third International Conference on Industrial, Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA-AIE 2010) Córdoba, España jun-10.

[Villagra et al. 2006] Villagra A., Montenegro C., Rasjido J., de San Pedro M., Lasso M., Pandolfi D. - PAE: una herramienta para la planificación del mantenimiento en locaciones petroleras. XII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación – CACIC 2006, Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Octubre 2006. pp. 1776-1787.

[Villagra et al. 2007] Villagra A., Montenegro C., de San Pedro M., Lasso M., Vidal P., Pandolfi D. - Mantenimiento de locaciones petroleras mediante un Algoritmo Multirecombinativo. 8° Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos (CAIP), julio 2007. Cap.11, pp 319-322.

[Villagra et al. 2008] A. Villagra, E. de San Pedro, M. Lasso, D. Pandolfi - Algoritmo multirecombinativo para la planificación dinámica del mantenimiento de locaciones petroleras. *Revista Internacional "INFORMACIÓN TECNOLÓGICA"*, Agosto 2008. Vol. 19 Numero 4 pp. 63-70.

[Richardson et al. 1989] Richardson J.T, Palmer M., Liepins G., and Hilliard M. Some Guidelines for Genetic Algorithms with Penalty Functions, In J. David Schaffer, editor, *Proceedings of the Third International Conference on genetic Algorithms*, pages 191-197; George Mason University, 1989. Morgan Kaufmann Publishers.

[Toth & Vigo 2001] Toth, P. and Vigo, D., An Overview of Vehicle Routing Problems., *Monographs on Discrete Mathematics and Applications*. In: *The Vehicle Routing Problem*. SIAM, 2001.

[Wilson 1975] Wilson E. O., *Sociobiology: a new synthesis*; Harvard University Press, 1975.

[Wynne-Edwards 1962] Wynne-Edwards, V. C.; *Animal dispersion in relation to social behavior*; Oliver y Boyd, Edimburgo, UK, 1962.

[Xu et al. 2005] Xu Y L, Lim M. H. and Er M. J. Investigation on Genetic Representations for Vehicle Routing Problem, *IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics*, pages 3083- 3088 2005.